

SIA 181:2006 Schallschutz im Hochbau

Raumakustik von Unterrichtsräumen und Sporthallen

Kurt Eggenschwiler

Empa, Abteilung Akustik, 8600 Dübendorf, Email: kurt.eggenschwiler@empa.ch

Die Norm SIA 181:2006 enthält neu Anforderungen an Unterrichtsräumen wie Schulzimmer, Seminarräume und Hörsäle sowie an Sporthallen. Damit sollen optimale raumakustische Verhältnisse für das Lernen und Lehren gewährleistet werden. Die Anforderungen sind in Form von Sollwerten mit Toleranzen für die Nachhallzeit formuliert.

1 Einleitung

Die Akustik in Schulzimmern ist seit einiger Zeit in pädagogischen und akustischen Kreisen ein stark beachtetes Thema. Eigentlich ist es erstaunlich, dass wir oft schlechte akustische Verhältnisse in solchen Räumen antreffen. Akustikfachleute sind enttäuscht, dass die seit Jahrzehnten bekannten Regeln der akustischen Gestaltung offenbar in der Praxis nicht umgesetzt werden. Lehrkräfte sind frustriert, dass Schul- und Baubehörden zu oft die Prioritäten falsch setzen. Werden andere Faktoren als gute Sprachverständlichkeit und gute Hörsamkeit beim Entwurf von Räumen viel höher bewertet, oder geht die Akustik einfach vergessen?

Es hat sich gezeigt, dass die bisher vorhandenen Richtlinien verbessert werden mussten. Die Anforderungen an Räume für Sprache wurden strenger formuliert. Die grundsätzlichen Anforderungen für Schulzimmer und Auditorien sind

- Sehr gute Sprachverständlichkeit.
- Natürliche Übertragung der Sprachlaute.
- Möglichst wenig Lärm von ausserhalb und innerhalb des Gebäudes.
- Möglichst wenig Lärm im Raum selber.
- Gute Musikhörsamkeit in Schulzimmern.

In den folgenden Ausführungen werden die Anforderungen auf Grund der Bedürfnisse von Lernenden und Lehrenden detaillierter formuliert. Es werden Hinweise gegeben, welcher Art die Anforderungen sind, und wie sie umgesetzt werden können.

2 Wirkung von Lärm und schlechter Akustik in Schulzimmern

Die Auswirkung von Lärm und schlechter Raumakustik auf das Lernen und Lehren werden aktuell in der Forschung untersucht. Es zeigt sich, dass die Lärmbelastung sich unmittelbar auf die mentale Leistung von Schüler/-innen und Lehrkräfte auswirkt. Schlechteres Sprachverständnis, verringerte Aufmerksamkeit und Konzentration, aber auch eine labilere psychische Verfassung sind die Folgen bei den Lernenden. Vor allem das Kurzzeitgedächtnis scheint zu leiden. Aber auch das soziale Klima wird schlechter, denn Lärm fördert Aggressionen. Es wird vermutet, dass lernschwache Kinder besonders beeinträchtigt werden. [2], [3]

Zurzeit laufen verschiedene Forschungsprojekte, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden kann. Im Folgenden werden aber einige Ergebnisse der Studie der Heriot-Watt University [3] dargestellt.

In die Studie wurden über 70 Unterrichtsräume von Grundschulen in Schottland, England und Nordirland einbezogen. Die Untersuchungen wurden in unbesetzten und besetzten Schulzimmern, und in solchen *ohne* akustische Massnahmen ("unbehandelt") und *mit* akustischen Massnahmen ("behandelt") durchgeführt. Verschiedene akustische Messwerte wurden ermittelt, ein spezieller Wortverständlichkeitstest WIPI für Kinder eingesetzt und ein Fragebogen für die Lehrenden ausgewertet.

Die gemessene Sprachverständlichkeit war in den unbehandelten Schulzimmern signifikant schlechter. Bei diesen Messungen wurden auch immer wieder besonders schlechte Plätze gefunden. Der Wortverständlichkeitstests (WIPI) ergab in den unbehandelten Schulzimmern ebenfalls signifikant schlechtere Werte. Besonders gross war der Unterschied, wenn die anderen Kinder arbeiteten und damit einen gewissen Lärmpegel im Raum verursachten. Die Nachhallzeiten in den unbehandelten Schulzimmern lagen besetzt im Mittel bei 0.6 Sekunden, bei den akustisch behandelten bei 0.4 Sekunden. Die Streuung wurde in der Zusammenfassung der Studie leider nicht angegeben. Es gibt aber einen Hinweis, dass einige kleinere der unbehandelten Schulzimmer mit ihren tiefen Nachhallzeiten den Mittelwert stark drücken. Viele Werte lagen offenbar im Bereich 0.9 - 1.0 Sekunden, einige darüber. Interessant war die Auswertung der Fragebogen für die Lehrkräfte:

- Lehrkräfte die ihre Schulzimmer als laut bewerten
 - leiden eher unter Kopfschmerzen.
 - neigen eher dazu, Halsprobleme in Verbindung mit ihrer Arbeit zu sehen.
 - melden sich bei Halsproblemen eher krank.
- Lehrkräfte die ihre Schulzimmern als zu hallig bewerten
 - glauben eher, dass die Akustik Einfluss auf die eigene Leistung hat.
 - glauben eher, dass die Akustik Einfluss auf die Leistung und das Verhalten der Kinder hat.
 - sind häufiger krank als ihre Kollegen.
- Lehrkräfte in Schulzimmern mit Akustikdecken leiden seltener unter Problemen mit Stimme und Hals.

3 Sprachverständlichkeit in Räumen

Eine gute Sprachverständlichkeit ist sowohl in Unterrichtsräumen als auch in Sporthallen unverzichtbar.

3.1 Einfluss von Störgeräuschen auf die Sprachverständlichkeit

Je mehr die Sprache durch Störgeräusche verdeckt wird, umso mehr wird die Sprachverständlichkeit beeinträchtigt, bis schliesslich die Sprache nicht mehr verständlich ist. Bei den Zuhörenden muss die Lautstärke der Sprache deshalb in einem vernünftigen Verhältnis stehen zur Lautstärke der Störgeräusche stehen. Hörbehinderte Menschen benötigen einen grösseren Abstand der Sprache zum Störgeräusch. Ebenso verhält es sich beim Hören von Fremdsprachen.

3.2 Einfluss der Raumreflexionen und der Nachhallzeit

In Räumen trifft nicht nur direkter Schall von den Sprechenden bei den Zuhörenden ein. Das Sprachsignal wird an Boden, Wänden und Decke viele Male reflektiert und erreicht darauf zeitlich verzögert das Ohr. Die eher wenig verzögerten Reflexionen werden vom Gehörsinn nutzbringend überlagert. Stärker verzögerte Reflexionen vermindern aber die Verständlichkeit. Negativ wirken sich aus:

- Zu langer Nachhall.
- Starke Schallreflexionen welche später als 50 Tausendstel Sekunden nach dem Direktschall eintreffen.
- Flatterechos, die z. B. durch wiederholte Reflexion des Schall an parallelen Wänden entstehen.

Der Nachhall setzt sich aus den vielen Schallanteilen zusammen, welche beim Ohr nach wiederholter Reflexion eintreffen. Wenn der Raum viele schallabsorbierende Materialien enthält, geht bei den Reflexionen an solchen Wandflächen viel Schallenergie verloren. Der Nachhall wird kurz. Im umgekehrten Fall - also bei Räumen mit überwiegend schallharten Flächen wie Beton, Glas etc. - entwickelt sich ein langer Nachhall.

3.3 Die Nachhallzeit

Der Nachhall wird durch die Nachhallzeit, gemessen in Sekunden charakterisiert. Sie bezeichnet die Zeit welche nach dem Verstummen einer Schallquelle vergeht, bis der Schalldruck im Raum auf einen Tausendstel des Anfangswertes gesunken ist. Die Nachhallzeit ist in den verschiedenen Bereichen der Tonhöhe unterschiedlich.

Für die Nachhallzeit gibt es Vorschläge für optimale Werte, welche sich für eine erste grobe Annäherung gut eignen. Im Mittelwerte liegt die Nachhallzeit bei 500/1000 Hz in grossen Konzertsälen bei etwa 2 Sekunden, in Sprechtheater etwa bei 1 Sekunde.

Die Nachhallzeit ist ein pauschales Mass für den ganzen Raum. Sie eignet sich gut als erster Zielwert für die Gestaltung von Räumen. Das Erreichen des Wertes garantiert aber noch nicht, dass auf allen Plätzen im Publikum die gewünschten Verhältnisse erreicht werden. Dazu muss auch die Form des Raums optimiert werden.

3.4 Messung und Prognose der Sprachverständlichkeit

Die Sprachverständlichkeit kann natürlich durch Befragung von Versuchspersonen ermittelt werden. Diese Methode ist aber ausserordentlich aufwändig. Es gibt akustische Messmethoden, welche heute diesen Zweck ebenfalls gut erfüllen. Verbreitet ist die Messung des Speech Transmission Index STI.

4 Akustische Gestaltung von Unterrichtsräumen wie Schulzimmern und Auditorien

4.1 Stand des Wissens: DIN 18041, Hörsamkeit in kleinen und mittelgrossen Räumen

Aus Altbekanntem und aus neuen Ergebnissen der Forschung lassen sich klare Anforderungen an Unterrichtsräume und Sporthallen ableiten:

- Die Lautstärke von Fremdgeräuschen muss begrenzt werden.
- Direktschall und starke frühe Schallreflexionen sollen gefördert, späte Raumreflexionen vermieden und der Nachhall kurz gehalten werden.

Besondere Anforderungen gelten für Hörbehinderte. [4] Zu berücksichtigen gilt es ferner, dass auch bei normalhörenden Kindern ein Anteil von vielleicht 20% z. B. durch eine Erkältung temporär ein etwas vermindertes Hörvermögen aufweisen kann. Nicht zuletzt spielt es eine Rolle, in welcher Sprache der Unterricht oder ein Vortrag stattfinden. Das Verstehen, und sicher auch das Lernen von Fremdsprachen erfordern höhere Anforderungen.

Diese allgemeinen Anforderungen wurden in letzter Zeit in verschiedenen Normen und Richtlinien konkretisiert. So wurde in Deutschland eine Revision der DIN 18041 (Hörsamkeit in kleinen bis mittelgrossen Räumen) veranlasst. Die heute vorliegende revidierte DIN 18041 [5] dokumentiert den Stand des Wissens. [6] Schulzimmer, Auditorien und Sporthallen sollen deshalb nach den Anforderungen der neuen DIN 18041 geplant oder saniert werden.

In der Schweiz wird die DIN 18041 von der schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA-SSA empfohlen [7] und entsprechende Kennwerte wurden jetzt in die revidierten Norm SIA 181 „Schallschutz“ im Hochbau aufgenommen. [1]

4.2 Vermeiden von Lärm - Anforderungen der DIN 18041

Normalhörende sind in Situationen ohne Nachhall in der Lage, Sprache auch dann noch knapp zu verstehen, wenn der Pegel der Störgeräusche 5 dB höher ist als das Sprachsignal. Für Hörbehinderte sollte der Pegel der Störgeräusche mindestens 15 dB tiefer sein. Da wir nicht beliebig laut sprechen können, resp. als Hörende auch nicht beliebige Lautstärken ertragen, darf das Störgeräusch eine gewisse Schwelle nicht überschreiten.

In der Norm DIN 18041 sind die Anforderungen zum zulässigen Störgeräusch nach Nutzungsarten in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1 Einstufung der zulässigen Störgeräuschpegel in dB(A) gemäss DIN 18041, Tabelle 1

Schalltechnische Anforderungen an die Raumnutzung	Störgeräuschpegel L_{NA} dB	Eignung ^a für eine Entfernung Sprecher-Hörer		Eignung ^a für Personen mit Hörverlusten	Eignung ^a für die Wahrnehmung schwieriger oder fremdsprachiger Texte
		mittlere ^{b,c}	grössere ^b		
I (mindest)	≤ 40	+	-	-	-
II (mittlere)	≤ 35	+	o	o	o
III (hohe)	≤ 30	+	+	+	+

^a) "+" geeignet, "o" bedingt geeignet, "-" nicht geeignet

^b) Für eine mittlere Entfernung zwischen Sprecher und Hörer kann üblicherweise ein Abstand von 5 m bis 8 m, für grössere Entfernungen > 8 m, angenommen werden.

^c) Auch geeignet für geringere Entfernungen zwischen Sprecher und Hörer bis etwa 5 m.

Im Raum selber sind Lüftungsanlagen und Geräte wie Hellraumprojektoren und Videobeamer oft störende Lärmquellen. Sie müssen entsprechend den obigen Forderungen dimensioniert und evaluiert werden.

Für Geräusche von ausserhalb (z. B. Strassenlärm, Fluglärm) und von anderen Räumen des Gebäudes (z. B. Haustechnische Anlagen, andere Klassenräume, Treppenhaus) sind in der Schweiz die Anforderungen der SIA 181 Schallschutz im Hochbau [1] einzuhalten.

4.3 Kurze Nachhallzeit gemäss DIN 18041

In der DIN 18041 [5] sind nach dem Stand des Wissens die optimalen Nachhallzeiten für Schulzimmer und Auditorien festgelegt. In anderen Ländern wurden ähnliche Regelungen getroffen (siehe z. B. [8], [9], [10])

Für Unterrichtsräume werden in der DIN die folgenden Anforderungen gestellt. Der anzustrebende Sollwert der Nachhallzeit T_{soll} in Sekunden als Mittelwert der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz wird abhängig vom Raumvolumen V in m^3 nach der folgenden Formel festgelegt siehe auch Diagramm in Abbildung 1:

$$T_{soll} = -0.17 + 0.32 \cdot \log(V) \quad \text{Formel (7) DIN 18041}$$

Die anzustrebende Frequenzabhängigkeit findet sich in Abbildung 2. Das Diagramm ist normiert auf T_{soll} !

LESBEISPIEL:

Für einen Raum mit einem Volumen von $250 m^3$ kann aus Abbildung 1 eine Soll-Nachhallzeit T_{soll} von 0.6 Sekunden abgelesen werden. Aus Abbildung 2 ergibt sich, dass die Nachhallzeit in den Oktavbändern 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz im Bereich von $T_{soll} \pm 20\%$ liegen sollte, also 0.48 - 0.79 Sekunden. In den Oktavbändern 125 Hz und 4 kHz im Bereich $T_{soll} - 40\%$ / $T_{soll} + 20\%$ also 0.36 - 0.78 Sekunden.

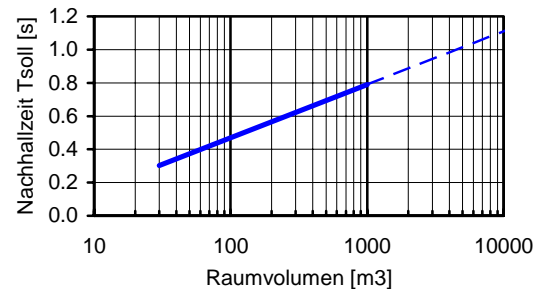


Abbildung 1 Sollwert T_{soll} der gemittelten Nachhallzeit zwischen 500 Hz und 1000 Hz im besetzten Zustand für Räume für Unterricht gemäss DIN 18041, Bild 1

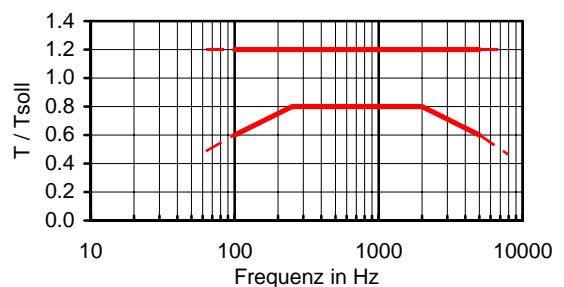


Abbildung 2 Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz für Sprache gemäss DIN 18041, Bild 2

Im unbesetzten Raum sollte die Nachhallzeit im Allgemeinen nicht mehr als 0.2 Sekunden über dem Sollwert liegen. Dies ist vor allem auch in grossen Auditorien zu beachten, welche oft bei stark unterschiedlicher Besetzung genutzt werden.

Für Personen mit eingeschränktem Hörvermögen sollten nach heutigem Kenntnisstand die anzustrebende Nachhallzeit vorrangig für Räume mit einem Volumen bis zu $250 m^3$ und der Nutzung Sprache/Unterricht in den Oktavbändern 250 Hz bis 2000 Hz bis 20% unter den in Abbildung 1 angegebenen Kurven liegen. Abbildung 2

ist in diesem Frequenzbereich nicht anzuwenden. Vergleichbare Anforderungen gelten auch für die Kommunikation in einer Sprache, die nicht als Muttersprache gelernt wurde, bei der Kommunikation mit Personen, die Deutsch als Fremdsprache sprechen, und die Kommunikation mit Personen, die auf andere Weise ein Bedürfnis nach erhöhter Sprachverständlichkeit haben, z. B. Personen mit Sprach- oder Sprachverarbeitungsstörungen, Konzentrations- bzw. Aufmerksamkeitsstörungen, Leistungsschwäche.

4.4 Anforderungen an die Nachhallzeit gemäss SIA 181:2006

In der SIA 181 sind die Anforderungen für Schulzimmer und Sporthallen in Anlehnung an die DIN-Norm 18041 in Abschnitt 4.3 festgelegt.

Die Soll-Nachhallzeit in Unterrichtsräumen ist damit gemäss Formel (7) DIN 18041 festgelegt, wie sie schon in Abschnitt 4.3 zitiert und in Abbildung 1 dargestellt wurde:

$$T_{\text{soll}} = -0.17 + 0.32 \cdot \log(V) \quad \text{Formel (7) DIN 18041}$$

Zudem gilt für den Toleranzbereich in Abhängigkeit von der Frequenz das Diagramme von Abbildung 2.

4.5 Gute Raumform

Mit einer akustisch guten Raumform kann der Schall richtig gelenkt werden, und es können negative Erscheinungen wie Echos und Flatterechos vermieden werden. Angaben zur richtigen Gestaltung finden sich in der DIN-Norm 18041 [5] und in Fachbüchern wie z. B. [11].

Versorgung mit Direktschall - freie Sichtlinie

Um die wichtige Versorgung mit Direktschall sicher zu stellen, müssen die Kriterien für freie Sichtlinien auch für die Akustik angewendet werden. Dies bedeutet für grössere Auditorien ansteigende Publikumsflächen oder hoch gelegte Podien. Der Grundriss und die Anordnung des Publikums müssen je nach Nutzung so optimiert werden, dass die Direktverbindung zwischen Sprechenden und Hörenden möglichst kurz ist. Für die Hörbehinderten ist es zusätzlich sehr wichtig, dass die Sicht für das Lippenlesen möglichst gut ist. Dazu ist auch eine geeigneten Beleuchtung der Vortragenden notwendig!

Frühe Schallreflexionen fördern

Frühe Schallreflexionen an der Decke oder an den Wänden sind zu fördern, weil sie die Sprachverständlichkeit verbessern und zu einer ausgeglicheneren Pegelverteilung im Raum führen. Frühe Schallreflexionen sind Reflexionen, die bei den Hörenden bezüglich des Direktschalls mit maximal 50 Tausendstel Sekunden Verzögerung eintreffen. Dies entspricht einem maximalen Umweg des Schalls von 17 m (siehe Abbildung 3).

Späte Schallreflexionen dämpfen

Späte Schallreflexionen (50 Tausendstel Sekunden nach dem Direktschall), welche natürlich vor allem in mittleren und grösseren Auditorien auftreten können, beeinträchtigen die Sprachverständlichkeit. Sie werden als Nachhall, als Echo oder gar als Flatterechos wahrgenommen. Die späten Schallreflexionen sollen deshalb möglichst gedämpft oder ganz vermieden werden.

Echos und Flatterechos vermeiden

Echos und Flatterechos können mit geometrischen Mitteln im Planungsstadium eruiert und damit vermieden werden. Massnahmen: Ebene Parallele Wände vermeiden, geometrisch richtige Lenkung des Schalls, Einsatz von Schallabsorption am richtigen Ort.

Die Rückwand sollte schallabsorbierend gestaltet sein, ausser es sei sichergestellt, dass keine Reflexionen zu den Sprechenden zurück geworfen werden. Konkave Flächen müssen besonders gut überprüft werden.

Die Untersuchungen mit den Mitteln der geometrischen Akustik sind nicht nur für die Sprecherstandorte durchzuführen, sondern auch für die künstlichen Schallquellen, also die Lautsprecher, welche in mittleren und grösseren Auditorien für die Sprachbeschallung eingesetzt werden.

Richtige Anordnung der Schallabsorber

Die wegen der Forderung nach einer kurzen Nachhallzeit notwendigen Flächen mit Schallabsorption sind im Idealfall so im Raum zu anzuordnen, dass nützliche Reflexionen nicht verhindert werden: Schematisch ist die Anordnung in Abbildung 3 gezeigt. Weitere Beispiele finden sich in der DIN 18049 [5]. Für Unterrichtszimmer ist allerdings zu erwähnen, dass das Erreichen der optimalen Nachhallzeit Priorität hat [12].

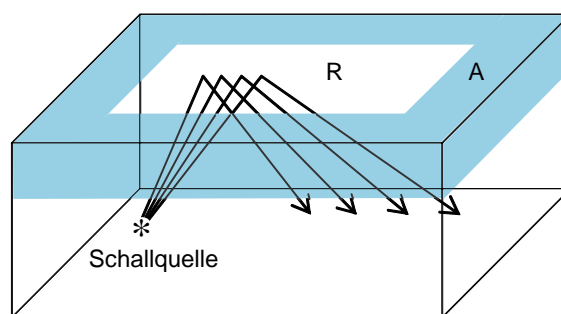


Abbildung 3 Möglichkeit der Anordnung reflektierender (R) und absorbierender (A) Flächen in einem Schulzimmer. Die reflektierende Fläche spiegelt nützlichen Schall in den hinteren Bereich des Raumes.

4.6 Vorgehen bei der Planung

Bei der Planung sollte frühzeitig eine akustische Beratung beigezogen werden. So können Form und Material überprüft und optimiert werden. AkustikerInnen mit dem Diplom "dipl. Akustiker/in SGA" haben eine Prüfung der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA bestanden.¹ Die Nachhallzeit kann bei einfachen Räumen mit der bekannten Formel von Sabine berechnet werden (siehe z.B. [5], [11], [13]). Für grössere Räume ist eine Computersimulation sinnvoll [14]. Siehe Kasten Seite 7.

4.7 Beschallung

In mittleren und grösseren Auditorien werden zur Unterstützung Beschallungsanlagen eingesetzt. [15] Leider werden dabei oft die anerkannten Regeln der Technik verletzt, so dass nicht selten eine Verminderung der Sprachverständlichkeit beim Betrieb der Anlagen festzustellen ist.

Eine Arbeitsgruppe der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA hat Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften für Beschallungsanlagen verfasst. [16] Die Richtlinie beschreibt die Funktion von Sprachbeschallungsanlagen, erklärt verschiedene Beschallungskonzepte, macht Vorschläge für das richtige Vorgehen bei Planung, Ausschreibung und Abnahme der Anlage und gibt *messtechnisch überprüfbare Anforderungen* an solche Anlagen. Die Anwendung der Richtlinie der SGA und der Einsatz von Simulationen der Beschallung auf dem Computer haben sich bei der Beschallung von Hörsälen sehr bewährt. [17]



Abbildung 4 Hörsaal mit einer optimalen Beschallungsanlage

4.8 Höranlagen für Hörbehinderte

Die DIN 18041 enthält Angaben zu Höranlagen für Hörbehinderte. Entsprechende Angaben mit Hilfen für die Planung finden sich auch in [4] und [16]. Die Planung von Höranlagen in Auditorien, bei welchen sich seitlich oder vertikal in unmittelbarer Nachbarschaft weitere Auditorien mit Höranlagen befinden, ist besonders anspruchsvoll. In solchen Fällen müssen ausgewiesene Planer beigezogen werden.

¹ <http://www.sga-ssa.ch/pdf/exams/experten.pdf>

5 Akustische Gestaltung von Sporthallen

5.1 Sporthallen in der DIN 18041

Für Sporthallen sind in der DIN Norm Anforderungen für die Nachhallzeit festgelegt. Sie werden hier erwähnt, um die Herkunft der Werte in der SIA 181:2006 zu zeigen.

Für Sport- und Schwimmhallen mit einem Volumen von 2'000 ... 8'500 m³ ohne Publikum sind die Nachhallzeiten wie folgt definiert (siehe auch Diagramm in Abbildung 5)

$$\text{Sport 1: } T_{\text{soll}} = -2.49 + 1.27 \cdot \lg(V)$$

$$\text{Sport 2: } T_{\text{soll}} = -1.74 + 0.95 \cdot \lg(V)$$

Sport 1: für normale Nutzung und/oder einzügigen Unterrichtsbetrieb (eine Klasse/Sportgruppe, einheitlicher Kommunikationsinhalt)

Sport 2: für mehrzügigen Unterrichtsbetrieb (mehrere Klassen/Sportgruppen parallel)

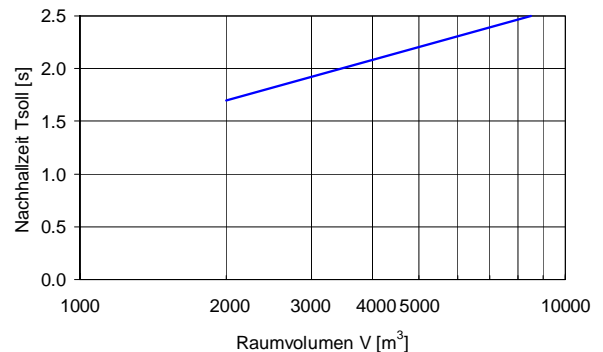


Abbildung 5 Nachhallzeit abhängig vom Raumvolumen für Sporthallen gemäss DIN 18041, Bild 1

5.2 Anforderungen für Sporthallen gemäss SIA 181:2006

Für Sporthallen mit 2'000 ... 8'500 m³

$$T_{\text{soll}} = -2,49 + 1,27 \lg(V) \quad (\text{s})$$

Beispiele: Für 2000 m³ ist $T_{\text{soll}} = 1,7$ s; für 5000 m³ ist $T_{\text{soll}} = 2,2$ s

Für Sporthallen darf der Sollwert T_{soll} im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz um nicht mehr als 20 % überschritten werden. Kürzere Nachhallzeiten sind vorzuziehen.

Für grössere Sporthallen ($V > 8'500$ m³) werden Sollwerte T_{soll} im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz von maximal 2.5 s empfohlen. Kürzere Nachhallzeiten sind vorzuziehen.

6 Beispiele

6.1 Schulzimmer "1"

Das Schulzimmer befindet sich in einer Berufsschule der 70er Jahre. Die Decke ist aus Beton, es gibt viele Fensterflächen und einige Holzwandkästen. Der Boden ist mit Spannteppichen belegt. Es sind keinerlei akustische Massnahmen erkennbar. Vom Lehrer wird die Akustik als sehr mühsam bezeichnet. Nach vier Stunden Unterricht klagt er regelmässig über Hals- z. T. auch über Kopfschmerzen. Die SchülerInnen äussern sich auch negativ über die Akustik. Oft ist die Kommunikation stark erschwert.

Die gemessene Nachhallzeit beträgt im unbesetzten Zustand im Mitteltonbereich rund 1.3 s. Die berechneten Werte des mit Schülern besetzten Schulzimmers liegen bei 1 Sekunde im Mitteltonbereich. Die Werte sind für ein Schulzimmer also eindeutig zu hoch. Der Spannteppich wirkt nur bei den hohen Frequenzen als Schallabsorber (siehe Nachhallzeit bei 4 kHz), reduziert aber immerhin die Geräusche von Stühle- und Möbelrücken. In dem für die Sprache wichtigen Mitteltonbereich (500 Hz - 2000 Hz) fehlt die Absorption.

Für eine Sanierung sind die Decke und die Seitenwände gemäss Berechnungen nach der Formel von Sabine teilweise schallabsorbierend zu verkleiden

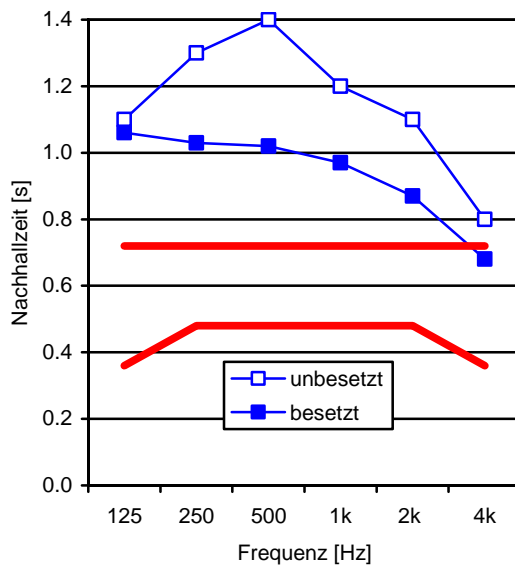


Abbildung 6 Nachhallzeit in Schulzimmer "1" (keine besonderen akustische Massnahmen).

6.2 Schulzimmer "2"

In einem neuen Schulhaus sind die Schulzimmer altersgemäss unterschiedlich gestaltet. Die Grundrisse sind selten Rechtecke und in jedem Raum anders. Bei der Planung wurde vom Architekten grossen Wert auf eine gute Akustik gelegt. Wegen der Kosten kam für akustische Massnahmen leider nur die Decke in Frage. Sie wurde mit einer einfachen Verkleidung versehen.



Abbildung 7 Schulzimmer "2".



Abbildung 8 Akustikdecke Schulzimmer "2"

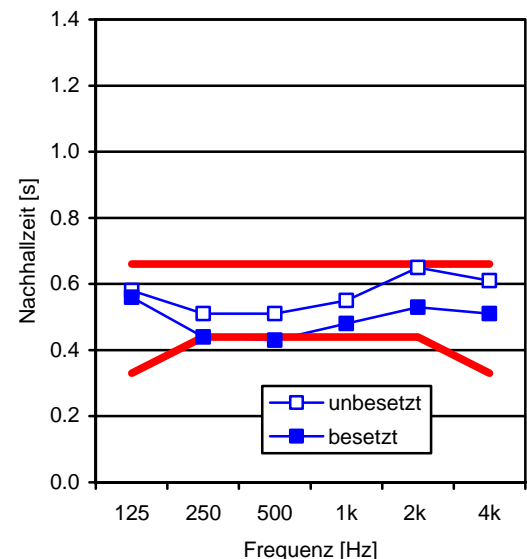


Abbildung 9 Nachhallzeit Schulzimmer "2".

Die erreichte Nachhallzeit liegt z.T. an der unteren Grenze des Toleranzbereichs. Die LehrerInnen sind sehr gut zufrieden mit den akustischen Verhältnissen. Die Sprachverständlichkeit ist gut. Auch Singen und Musizieren ist gut möglich, was der Musiklehrer bestätigt.

Hörsaal an Hochschule

In einem architektonisch ansprechenden grossen Hörsaal einer Hochschule beschwerten sich vor allem Dozenten über die angeblich schlechte Akustik.

Bei einem Augenschein sind akustische Massnahmen deutlich erkennbar. Ein Blick in die Akten zeigt, dass die Nachhallzeit optimal ist, was auch hörbar ist. Sprechversuche und Händeklatschen machen aber ein Mehrfachecho hörbar. Ursache ist die Rückwand, welche ideal für Rückwürfe und Mehrfachechos ausgerichtet ist. Sie sind auch beim Betrieb der Beschallungsanlage hörbar (siehe Abbildung 10).

Es genügt nicht, nur die Nachhallzeit zu optimieren. Ebenso wichtig sind Massnahmen zum richtigen Lenken des Schalls und zum Vermeiden von Echos und Flutterechos (siehe 4.5). Eine Sanierung durch eine absorbierende Verkleidung der Rückwand ist ohne weiteres möglich, verursacht aber Kosten und Umstände.

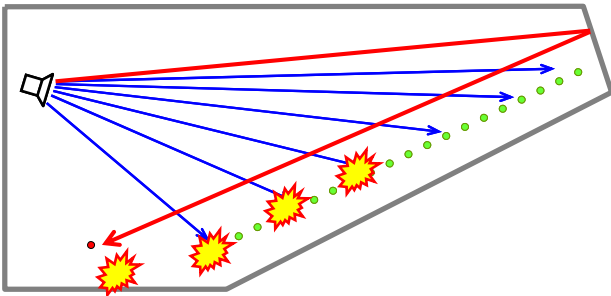


Abbildung 10 Schematische Darstellung des störenden Schallrückwurfs in einem Hörsaal



Abbildung 11 Schallreflektierende Rückwand eines Hörsaals

6.3 Stark vereinfachtes Berechnungsbeispiel (aus [1])

Welche Fläche von Absorptionsmaterial mit dem Absorptionsgrad α ist in folgendem Raum notwendig, um eine Nachhallzeit von T_{soll} zu erreichen?

Grundfläche: 72 m^2 , Höhe: 3.5 m , Volumen: 250 m^3

Nachhallzeit: 1.3 s (Zustand ohne besondere akustische Massnahmen)

Eine Berechnung mit der statistischen Nachhalltheorie (Formel von Sabine) ergibt für diese Raum:

Tabelle 2 Einfaches Berechnungsbeispiel für ein Schulzimmer

	$T_{\text{soll}} = 0.7 \text{ s}$	$T_{\text{soll}} = 0.5 \text{ s}$	$T_{\text{soll}} = 0.3 \text{ s}$
$\alpha \approx 0.8$	35 m^2	60 m^2	130 m^2
$\alpha \approx 0.6$	45 m^2	85 m^2	175 m^2
$\alpha \approx 0.4$	90 m^2	165 m^2	350 m^2

In diesem Raum könnte mit gut absorbierendem Material ($\alpha \approx 0.8$) bereits mit einer Verkleidung von etwas mehr als der halben Deckenfläche die Nachhallzeit stark reduziert werden.

Die Formel von Sabine

Die Nachhallzeit in einfachen Räumen kann mit der Formel von Sabine einfach berechnet werden. Die Berechnung wird in den Oktavbändern (63 Hz), 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz durchgeführt.

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{A}$$

T = Nachhallzeit [s]

V = Raumvolumen [m^3]

A = äquivalente Absorptionsfläche [m^2]

$$= \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots$$

α_i = Absorptionsgrad der i -ten Fläche

s_i = Flächeninhalt der i -ten Fläche [m^2]

Das Verfahren lässt sich einfach mit einem Tabellenkalkulationsprogramm durchführen. Die Absorptionsgrade finden sich in einschlägigen Tabellen oder sind vom Hersteller erhältlich.

Die Formel basiert auf der Annahme eines diffusen Schallfelds. Wird diese Voraussetzung stark verletzt, ergeben sich grosse Fehler. Dies trifft vor allem dann zu, wenn die Absorption einseitig verteilt ist und der Raum parallele ebene Flächen aufweist (siehe Abschnitt 6.4).

Computersimulation

Die raumakustischen Simulation auf dem Computer basiert auf der geometrischen Akustik. Sie unbedingt für die Planung und Sanierung von Räumen einzusetzen, bei denen Faustregeln und die Formel von Sabine nicht genügen. [14]

Besonders für die Planung von Beschallungsanlagen (Hörsaal, grosse Aula, Mehrzwecksaal, etc) ist der Einsatz von Computersimulationsverfahren sehr zu empfehlen und auch nicht besonders kostspielig. [16]

6.4 Sporthalle

Dieses Beispiel behandelt die theoretische Studie einer quaderförmigen Sporthalle. Das Beispiel ist fiktiv, jedoch gab es verschiedene praktische Fälle, in denen die beschriebenen Mechanismen für Bauherrschaft und Akustiker unangenehm in Erscheinung traten.

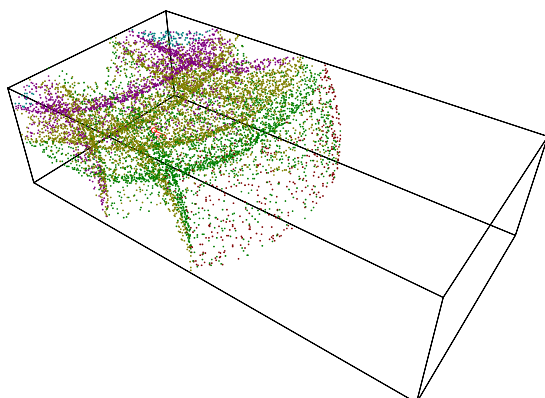
Es handelt sich um eine Sporthalle von 12 m Breite, 24 m Länge und 6.3 m Höhe. Dies ergibt ein Raumvolumen von 1'800 m³. Eine Seitenwand ist praktisch vollflächig verglast. Die andere Seitenwand und die Stirnwände sind aus Ziegelsteinen gemauert. Die Decke ist mit einer schallabsorbierenden geschlitzten Holzverkleidung versehen, welche im Mitteltonbereich einen Absorptionsgrad von rund 0.55 ausweist.

Bei einem Volumen von 1'800 m³ ergibt sich gemäss den in Abschnitt 5.2 aus der SIA 181 zitierten Anforderungen eine Soll-Nachhallzeit von 1.64 s und eine Maximalnachhallzeit im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz von knapp 2 s.

Eine einfache Berechnung mit der Formel von Sabine ergibt die in Abbildung 14 dargestellte Nachhallzeit von rund 1.5 s im Mitteltonbereich (untere Kurve). Damit wären die Anforderungen gemäss SIA 181 eingehalten.

Erfahrene Akustik-Fachleute wissen aber, dass in solchen Räumen die Berechnung nach Sabine nicht stimmt. Die Formel basiert auf der Annahme, dass die Absorption einigermaßen regelmässig auf den Raumboflächen verteilt ist, was hier nicht zutrifft.

Die Berechnung mit einer Raumakustik-Simulationssoftware auf dem PC (siehe Abbildung 12) ergibt die in Abbildung 14 dargestellten Werte (obere Kurve mit ausgefüllten Symbolen). Die Anforderungen sind nicht erfüllt. Eine Nachmessung ergäbe Nachhallzeiten die wenig von den Resultaten der Simulation abweichen würden.



Ref.: order/akustur:00 [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12]
Odeon©1985-2005

Abbildung 12 Berechnung der Schallausbreitung in einer Turnhalle nach dem Ray Tracing Verfahren (Geometrische Akustik). Hier sind 10000 Billardkugeln dargestellt, 34 Tausendstel Sekunden nach „Abschiessen“ bei der Schallquelle.

Eine reine Berechnung mit der Sabine-Formel ohne Beachtung raumakustischer Grundregeln kann dem Akustikbüro und der Bauherrschaft in solchen Fällen teuer zu stehen kommen ...

Es wird damit rechnerisch die Erfahrung bestätigt, dass in Turnhallen eine Stirnfläche und eine Seitenflächen zusätzlich verkleidet werden sollten. Die Ergebnisse der Simulation für diese Fälle ist in Abbildung 15 dargestellt. Die verwendete Verkleidung ist ballwurfsicher und hat im Mitteltonbereich einen Absorptionsgrad von rund 0.50. Die Berechnung mit der Sabine-Formel stimmt jetzt übrigens viel besser mit der Simulation und der Realität überein!

In Abbildung 16 und Abbildung 17 ist dargestellt was passiert, wenn nur eine Seitenwand oder nur eine Stirnwand verkleidet würde. Besonders im Fall der Verkleidung einer Seitenwand sind übrigens unangenehme Flatterechos zu erwarten (siehe Abbildung 13).

In Sporthallen genügt es also nicht, nur die Decke schallabsorbierend zu verkleiden! Einfache Nachhallzeitberechnungsverfahren versagen. Mit der Erfahrung von guten Akustikbüros und/oder dem Einsatz der richtigen Berechnungsmethode lassen sich unangenehme Überraschungen vermeiden. Zudem kann der Einsatz des akustischen Materials optimiert werden, was in diesem Beispiel allerdings nicht weiter ausgeführt wurde.

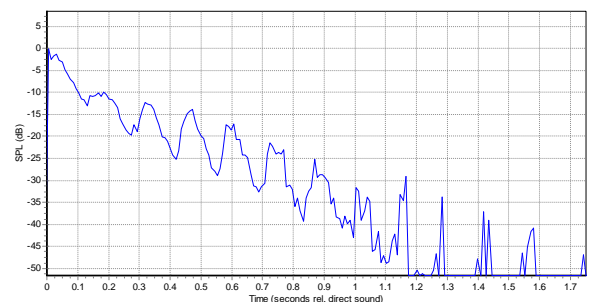


Abbildung 13 Berechnete Verlauf des Schallpegels in Funktion der Zeit für den in Abbildung 17 dargestellt. Situation. Es sind deutlich die periodisch wiederkehrenden Echos zu erkennen, welche als Flatterecho die Sprachverständlichkeit vermindern.

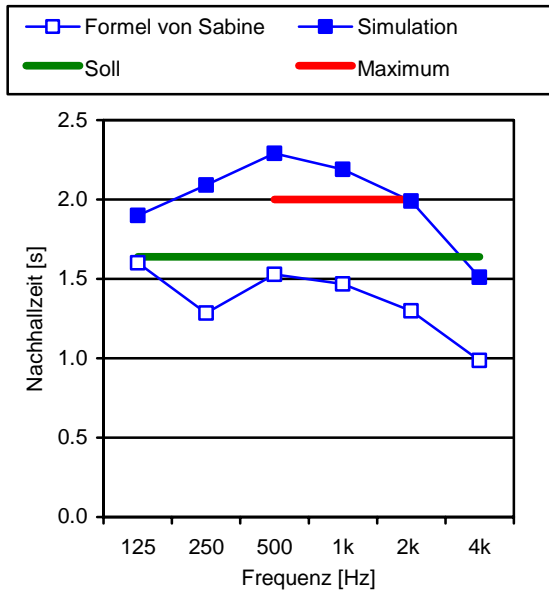


Abbildung 14 Berechnete Nachhallzeit in einer Sporthalle mit schallabsorbierender Decke. Die Anforderung der SIA 181 werden nicht erfüllt sein, denn die reale Nachhallzeit wird eher den Ergebnissen der Simulation als jenen der Sabine-Formel entsprechen.

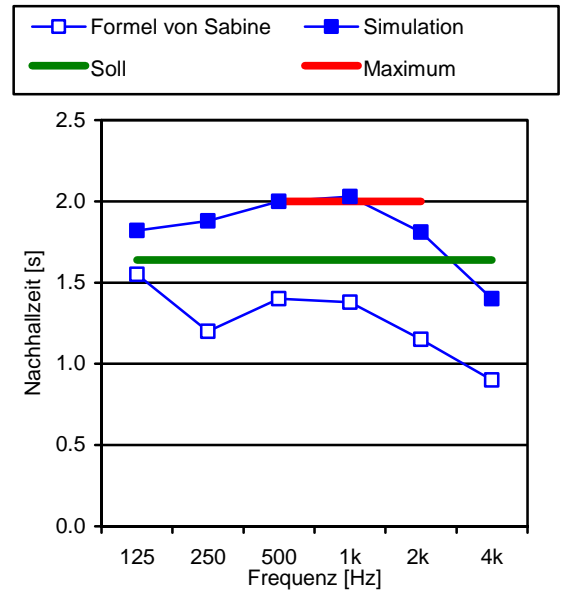


Abbildung 16 Berechnete Nachhallzeit in einer Sporthalle mit schallabsorbierender Decke und einer absorbierenden Stirnwand. Achtung: Gefahr von Flatterechos!

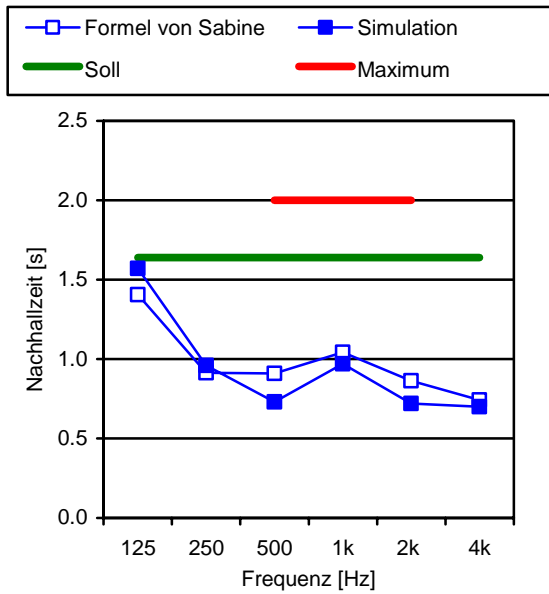


Abbildung 15 Berechnete Nachhallzeit in einer Sporthalle mit schallabsorbierenden Decke mit zusätzlich schallabsorbierend verkleideter Seitenwand und Stirnwand Die Anforderung ist sehr gut erfüllt.

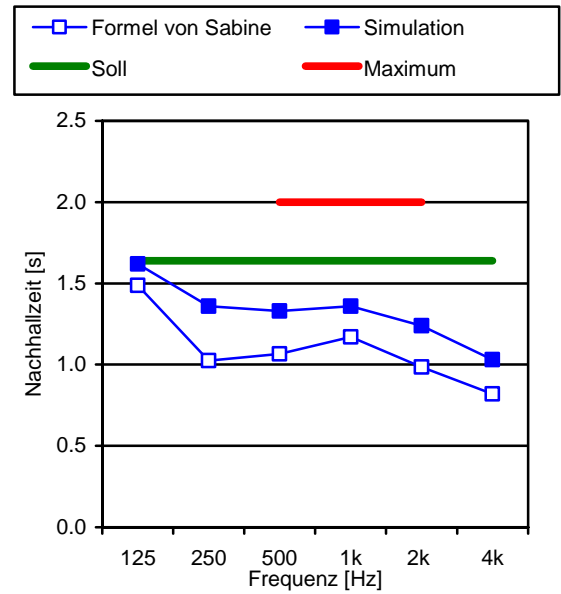


Abbildung 17 Berechnete Nachhallzeit in einer Sporthalle mit schallabsorbierender Decke und einer absorbierenden Seitenwand Die Anforderung an die Nachhallzeit ist zwar erfüllt, jedoch ist mit stark störenden Flatterechos zu rechnen (siehe Abbildung 13).

Literatur

- [1] Schweizer Ingenieur und Architekten Verein SIA, Norm SIA 181: 2006 Schallschutz im Hochbau
- [2] Ludowika Huber, Joachim Kahlert, Maria Klätte. Die akustisch gestaltete Schule: Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören ; Band 3, Vandenhoeck & Ruprecht 2002.
- [3] Mackenzie, David J. Airey, Sharon (1999), Classroom acoustics – a research project. Summery report. Heriot-Watt University Edingburgh.
- [4] Eggenschwiler K., Karg S., Norman D., Hörbehindertengerechte Gestaltung. Beschallungsanlagen, Höranlagen und Raumakustik. Schweizerische Fachstelle für behindertengerechtes Bauen. Zürich 2002
- [5] DIN 18041, Ausgabe: 2004-05. Hörsamkeit von kleinen und mittleren Räumen.
- [6] Tennhardt H.-P., Einfluss des aktuellen Wissensstands auf die Normung im Bereich der Klassenraumakustik. DAGA 2003
- [7] SGA (Hrsg.), Richtlinie für die Akustik von Schulzimmern und anderen Räumen für Sprache. SGA, 21. Juni 2004, (<http://www.sga-ssa.ch>), deutsch, französisch und italienisch.
- [8] ANSI S12.60-2002 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools
- [9] Department for Education and Employment (DfEE). Guidelines for environmental design in schools. Building Bulletin 87 (BB87). DfEE. (1997) Building Bulletin 93 Part A
- [10] Swedish Standard Institution. SS 02 52 68 Acoustics – Sound Classification of spaces in buildings – institutional premises, room for education, day centres anf after school centers, room for office work and hotels. SIS. (in Swedish) 2001
- [11] Fasold W., Veres E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin 2003
- [12] Mommertz E., Drescher K., Enger G., Untersuchung zur Anordnung schallabsorbierender Oberflächen in Klassenräumen. DAGA 2003, Aachen
- [13] EN 12343-6. Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 6: Schallabsorption in Räumen.
- [14] Eggenschwiler Kurt, Heutschi Kurt, Raumakustische Planungs- und Messverfahren. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 38 17. September 1998, Seiten 12 - 16
- [15] Eggenschwiler K., Baschnagel K., Anforderungen an Beschallungsanlagen für Hörsäle, DAGA 2003 in Aachen.
- [16] Eggenschwiler K., Desarnaulds V., Imhof, Th., Köller W., Norman D., Beschallungsanlagen für Sprache. Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften, Schweizerische Gesellschaft für Akustik SGA, 2001, <http://www.sga-ssa.ch>
- [17] Eggenschwiler K., Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement, Forum Acusticum, Budapest 2005, p. 2059 - 2064